

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫三：計算風工程中空氣動力特性之研究

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-032-015-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

執行單位：淡江大學航空太空工程學系(所)

計畫主持人：李世鳴

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告

結構之風力載重及受風反應（I）

子計畫三：計算風工程中空氣動力學特性之研究

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC 91 - 2211 - E - 032 - 015 -

執行期間： 91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

計畫主持人：李世鳴

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學航空太空工程學系（所）

中 華 民 國 92 年 10 月 30 日

前言

使用電腦進行空氣流場的風洞實驗在現今的建築設計上已經不是新奇的事，而是確保建築物可達最高之安全性與成本之平衡。然而在經濟效益與時間上數值模擬仍是廣泛被採用的趨勢，如何在風工程上選擇使用正確的數值方法與紊流模式來計算便是吾人所要達成的目標。

在風工程中最被關注的是精確的計算風的力量，使得結構可以承受的住而不崩潰。然而正確的數值模擬的條件設定便是關鍵，以下有幾點是要考慮的：

(1).氣候是由風的潮流組成的：風工程中最重要也是變數最多的便是氣候，在不同的地區有不同的氣候系統，因而有不同的風效應。故需要對不同地區的模擬作不同邊界狀態設定。(2).大氣邊界層：大氣邊界層是風與地球表面相互作用之後的結果，風由地表到邊界層之間隨高度的梯度受到阻礙物的引響，如樹木、大樓或是地勢的起伏。(3).建築物：建築物便是在地表常見的阻礙物，與風的交互影響也更多，建築物不同的外形與長寬比將使得建築物承受不同的負載力。

"鈍體(Bluff Body)就是流場中流線無法順此表面物體流過，會使得流場產生分離，且具有寬厚的尾流之物體。"

鈍體具有非流線型外型，當在流場中突放入鈍體，可想而知的鈍體便會與流場產生組抗；由於高壓阻力作用在流場與鈍體表面上，而在鈍體表面有一大面積的分離流區域以及相當大的尾流。此流場通常為不穩定具有週期性之渦漩產生與剝離。而鈍體空氣動力學已被廣泛的在工程上與設計上應用，包含橋梁、煙囪、高塔、近海或海面上的輸油管及建築、熱交換器、大樓、高壓電塔、纜線...等，鈍體空氣動力學在風工程領域中具有相當基礎與重要的成份。

大氣邊界層(Atmospheric Boundary Layer)是由(1)地球的轉動(2)空氣的浮力(3)空氣表面的阻力(4)地形特徵來影響的。而在大氣邊界層 100 到 200 呎的低空大氣中，空氣垂流通動的動能和可以熱傳的熱傳量是一個定值。其中我們利用流體的相似性來達到大氣邊界層的模擬，大氣邊界條件的相似性可以從質量、能量是否守恆來判斷，其相似性包括幾何性、動能性、動力性、熱傳相似、還有邊界狀態的相似。

研究目的

將計算流體力學應用在風工程領域，最早是在 80 年代中期由 Summer et al(1986)、Matthews(1987)以及 Murakami 和 Mochida(1988)，起初便是使用標準的 $k-\varepsilon$ 紊流模式來模擬建築物周圍的流場，而大渦流模式(Large eddy simulation)也在這個時期被使用來模擬流場 Murakami et al(1987)。這一些測試使得我們可以初步分析包含了阻礙流場與了解標準的 $k-\varepsilon$ 紊流模式在非等向性渦流模式中的不完全，現今與未來計算風工程所要努力的方向便是：(1).改進 $k-\varepsilon$ 紊流模式之在迴流與分離區之缺點，(2)延伸發展雷諾平均 Navier-stoke 基礎的紊流模式，(3)強化使用 Large Eddy Simulation(簡稱 LES)紊流模式來進行風工程問題預測。由於此因素，許多修改過的 $k-\varepsilon$ 紊流模式也都在現今被應用在風工程或是機械工程中，而在 LES 技術的下使得模擬的精確度有大大的改善。

雖然計算風工程已經經過一段時間的發展，也將有限元素法應用在風工程的結構分析上，但仍然有許多的問題存在，包含如邊界條件與近壁方程式的處理，但更

大的問題便是建立在高亂度與複雜流場的紊流模式。而 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式便是在現今紊流模擬研究領域中已被驗證具有相當準確性的紊流模式，而不只在流場回流與分離處有相當準確的模擬，更是省去使用近壁方程式。

研究方法

風通過建築物時，雖風之雷諾數並不大，但由於建築物之尖角與方柱形之外形，致使得建築物在尖角處周圍之流場有分離、在頂部與底部有回流、在背部有壓力集中渦柱，故在數值模擬時需使用紊流模式來計算模擬此一複雜之流場狀態。研究方法為：使用 ICEMCFD 網格產生器產生正交網格，而後網格匯入泛用型商業軟體 STAR-CD 進行數值模擬，且搭配使用 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式，使用後處理軟體 TECPLOT 作為流場可視化。

$\overline{v^2} - f$ 紊流模式

$\overline{v^2} - f$ 紊流模式為一簡化為三個傳輸方程之橢圓鬆弛模式，其理論基礎建立在對紊流黏滯力之假設，其包含亦使用在近壁區域流場之非等向性的紊流尺度 v_2 ， v_2 與正向之雷諾應力相似。高雷諾數的之紊流模式在接近固體邊界部分需要外加消散方程來修正，而 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式正可避免需要在近壁區域使用外加消散方程，通常來說使用消散方程式會修正在近壁區域過度預測的紊流黏滯力，亦不需要剪應力項 $\overline{u_j u_i}$ 。由於這個因素 Dubin 在 1991 年提出在近壁部分的紊流黏滯係數使用

$v_T = C_\mu \overline{u_2 u_2} T$ 表示其中 $T = k/\varepsilon$ ，此表示式與標準的 Prandtl-Kolmogorov 方程相似，當中使用 $u_2 u_2$ (當中之 2 表示與壁面正交之方向) 替代就如同提供壁面上紊流黏滯力應有的消散。然而雷諾應力在雙方程式中並不被拿來計算，既然 $u_2 u_2$ 無法由包氏 (Boussinesq) 假設計算得到，故 Dubin 便求解一傳輸方程之速度純量 v^2 ，直接由管流

中垂直壁面之雷諾應力導出 $\frac{Du_2 u_2}{Dt} = kf_{22} - \frac{u_2 u_2}{k} \varepsilon + \nabla q((v + v_T) \nabla u_2 u_2)$ 、

$$f_{22} - L^2 \nabla^2 f_{22} = \frac{1}{k} \phi_{22}^h \quad f_{22} - L^2 \nabla^2 f_{22} = \frac{1}{k} \left(\phi_{22}^h + \frac{u_2 u_2}{k} \varepsilon - \frac{2}{3} \varepsilon \right), \quad f_{22} = \frac{-20 v^2 \overline{u_2 u_2}}{\varepsilon x_2^4}$$

在 $\overline{v^2} - f$ 模式中，方程式 $\overline{u_2 u_2}$ 與 f_{22} 使用 v^2 與 f 代換來解 k 與 ε ，而 v^2 不再等同於雷諾應力中的 $\overline{u_2 u_2}$ ，必需考慮成一在近壁面上垂直固體邊界之速度量，此提供了計算在固體邊界上紊流的非等向性， $\overline{v^2} - f$ 模式包含以下之方程式：

$$\begin{aligned} \frac{DU}{Dt} &= -\nabla p + \nabla q((v + v_T)(\nabla U + \nabla^t U)) & \text{Length and time scales} \\ \frac{Dk}{Dt} &= P - \varepsilon + \nabla q((v + v_T) \nabla k) & L = C_L \max \left[\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, C_\eta \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right] \\ \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \frac{C_{\varepsilon 1}' P - C_{\varepsilon 2}' \varepsilon}{T} + \nabla q \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) & T_s = \max \left[\frac{k}{\varepsilon}, C_T \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \quad C_{\varepsilon 1}' = 1.4 \left(1 + 0.045 \left(\frac{k}{v^2} \right)^{1/2} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{D\overline{v^2}}{Dt} = kf - \frac{\overline{v^2}}{k} \varepsilon + \nabla g \left((v + v_T) \nabla \overline{v^2} \right)$$

$$C_\mu = 0.22 \quad C_L = 0.25 \quad C_\eta = 85$$

$$f - L^2 \nabla^2 f = (C_1 - 1) \frac{\left(2/3 - \overline{v^2}/k \right)}{T} + C_2 \frac{p}{k}$$

$$C_1 = 1.4 \quad C_2 = 0.3 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.9 \quad \sigma_\varepsilon = 0.13$$

$$v_T = C_\mu v' T, \quad P = 2v_T S_{ij} S_{ij}$$

$\overline{v^2} - f$ 紊流模式測試

在兩無限平板間放入一高度為平板一半之方塊，而在入流邊界使用完全發展之入流狀態(如圖一)，流場通過方柱周圍將會產生不同的回流區(如圖二)。計算域寬度為 $3H$ ，方柱高為 H ，方柱至入口距離 $6H$ ，方柱至出口距離為 $13H$ ，上下皆為固體邊界，左右邊界為對稱面邊界，原點設定在於迎風面與底面的交點處，入口速度為給定邊界條件，其分佈剖面使用 $1/7$ 的 power law，入口紊流動能與紊流消散值的分布分別為數度長度尺度與紊流動能之函數 $K_{in} = 0.008u_{in}^2$ 與 $\varepsilon_{in} = \frac{K_{in}^{\frac{3}{2}}}{H}$ 。且另與 4 種紊流

模式比較分別為 RNG、CHEN、 $k - \varepsilon$ High Reynold、Quadratic High Reynold。

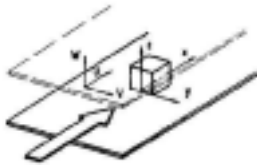
結果與討論

在平版流中通過三維方柱之流場分析中要模擬出方柱上方、前方與後方之渦漩之現象，使用商用軟體常用之標準 $k - \varepsilon$ 紊流模式在適當流速下均可呈現出與實驗觀察相似之現象，此為定性之觀察，但若以定量之觀察看來標準 $k - \varepsilon$ 紊流模式便與實驗值有許多差距，而使用 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式便可更接近實驗值。

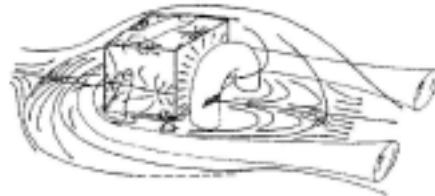
由在對稱面流場圖(如圖三)觀察可得知使用 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式在方柱後方在接觸點之預測，明顯比其他紊流模式佳，而由速度剖面(如圖五(a))可觀察在方柱上方的速度分佈皆與實驗十分相近，其中 $k - \varepsilon$ High Reynold 較無法準確預測回流區，而在尾流部份(圖五(c))便發現 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式上半部流場明顯預測較佳。

在本次計畫中發現使用 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式對於網格有許多要求，如對於網格能夠充分掌握，在外型較多變化建築物之流場、壓力預測上相信將有更準確之預測。而在 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式的使用上仍需克服其在數值上較敏感之問題。

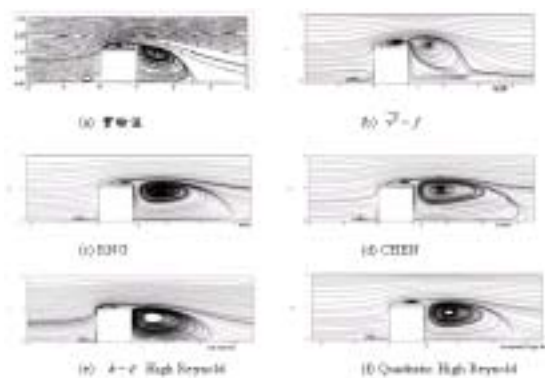
附錄



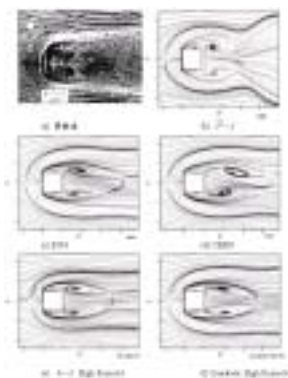
圖一 $\overline{v^2} - f$ 紊流模式測試說明示意圖



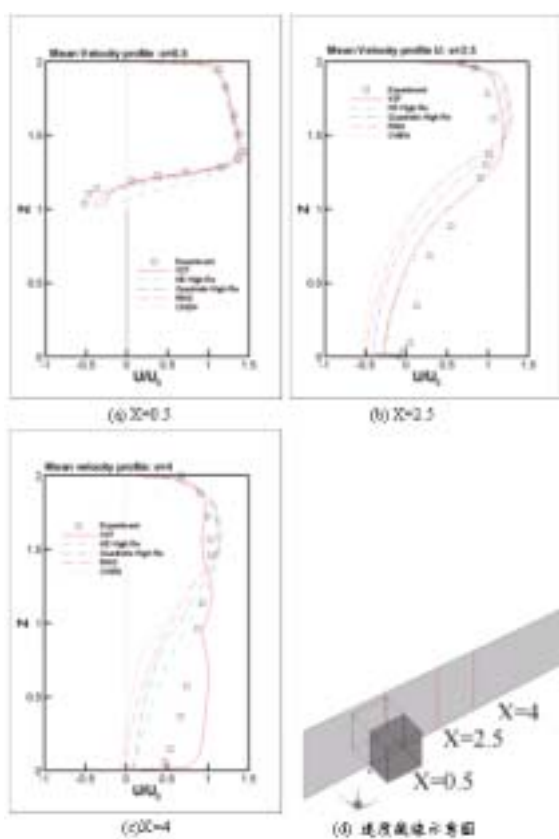
圖二 流經方柱三維流場示意圖



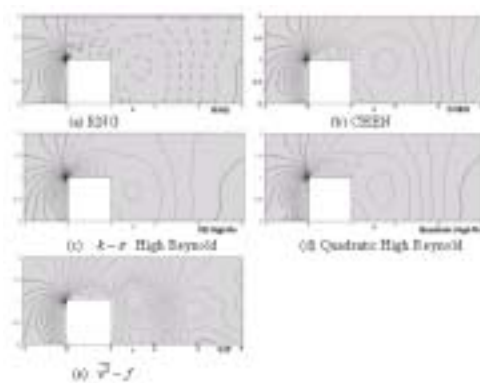
圖三 方柱對稱面流線圖



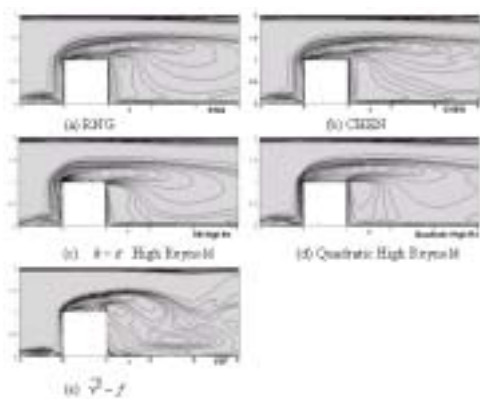
圖四 高度平面流線圖(方柱根部)



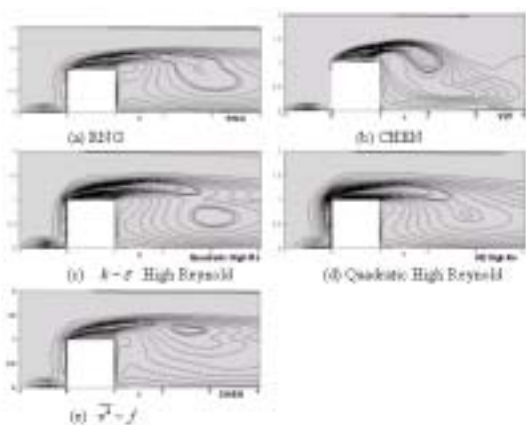
圖五 對稱面上沿流場方向速度截線比較圖



圖六 方柱對稱面壓力等高線圖



圖七 方柱對稱面紊流強度等高線圖



圖八 方柱對稱面能量消散率等高線圖